

Variabilité de la densité apparente sur un nitisol dérivé de cendres volcaniques: effet sur le système racinaire du bananier de hautes altitudes de l'Afrique de l'Est (*Musa AAA-EA*)

[Change in soil bulk density on a nitisol derived from volcanic ash: effect on the rooting system of the East African Highlands banana (*Musa AAA-EA*)]

Tony M. Muliele and Constantine Manzenza Mafuta

Laboratoire de sols, Centre de Recherche de M'vuazi,
Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomiques, Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2017 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Bulk density is one of the main soil physical properties that affect root growth and development. This study aimed at characterizing bulk density distribution in a nitisol derived from volcanic ash, and assessing its effect on the rooting system of the East African Highlands Banana. Sixteen soil profiles (2m large x 1m depth) were dug at 40 cm from banana mat of second cycle at pre-flowering stage. At 10 cm increments, banana root density and soil bulk density were measured simultaneously. Soil bulk density was measured by gravimetric method, three replicates per soil depth. Soil texture and organic carbon content were also determined. Banana root density (roots.dm⁻²) was determined by overlying a 2 m² grid and counting roots in each 1 dm² grids. Results highlight a gradient in soil bulk density with values ranged between 0.85 to 1.08 g.cm⁻³. The lowest bulk density values were observed in the 40 cm topsoil, which also had most roots density (77%). Root density decreased sharply in deeper soil layers (<0.90 root.dm⁻² below 40 cm depth) with increase in clay content, and decrease in soil organic carbon content. To improve banana root growth and development in compacted soils, we recommend agricultural practices that decrease soil bulk density, especially the addition of soil organic matter throughout mulching, and tillage before banana planting.

KEYWORDS: Bulk density, Soil texture, Nitisol, Bananas, Root density.

RESUME: L'objectif de cette étude était de caractériser la distribution de la densité apparente sur un nitisol dérivé de cendres volcaniques, et d'évaluer son effet sur le système racinaire du bananier de hautes altitudes de l'Afrique de l'Est. Seize profils (2m de large x 1m de profondeur) ont été ouverts à 40 cm du pseudo-tronc des bananiers de deuxième cycle au stade préfloraison. De 0-100 cm de profondeur, tous les 10 cm ; la densité apparente (g.cm⁻³) et la densité racinaire (racines.dm⁻²) du bananier ont été mesurées simultanément. La teneur en carbone organique et la texture du sol ont également été déterminées. Les résultats ont permis de mettre en évidence un gradient de distribution de densité apparente avec des valeurs variant entre 0,85 et 1,08 g.cm⁻³. La majorité de racines (77%) a été observée sur les quarante premiers cm du sol, caractérisés par des teneurs élevées en carbone organique et des teneurs plus faibles en argile. L'accroissement de la densité apparente dans les couches profondes du sol a entraîné une discontinuité structurale qui a réduit sensiblement la densité racinaire (<0,90 racine.dm⁻² à plus 40 cm du sol) et limité l'exploration racinaire du bananier. Pour améliorer la croissance et le développement racinaire du bananier sur des sols plus denses, il serait nécessaire d'appliquer les pratiques culturales qui permettent de réduire la densité apparente, notamment l'apport de la matière organique et le travail du sol avant la plantation du bananier.

MOTS-CLEFS: Densité apparente, Texture, Nitisol, Bananier, Densité racinaire.

1 INTRODUCTION

Le développement et la distribution racinaires des plantes ne dépendent pas seulement du génotype, ils sont également affectés par les facteurs environnementaux [1] dont les propriétés physiques du sol [2]. Les principales propriétés physiques du sol qui peuvent affecter négativement la croissance et la distribution racinaire sont la texture, la densité apparente (DA), la teneur en eau du sol, la porosité et la résistance mécanique [3, 4].

La DA, en particulier, est une propriété clé de la qualité du sol qui permet de déterminer le niveau de fertilité d'un sol [5]. Elle dépend de la teneur en carbone organique (Corg) du sol, de la texture et de la densité des particules minérales du sol (argile, limon, sable), et de la structure du sol [6]. Dans les études de durabilité des systèmes de cultures, la DA est généralement utilisée comme un indicateur de la compaction du sol [5]. Du point de vue agronomique, la compaction du sol accroît la résistance mécanique du sol, ce qui limite la croissance et le développement racinaire et par conséquent, réduit le volume du sol exploitable par les racines, prédispose les plants inadéquatement fixés au sol à la verse et réduit le rendement de cultures [7, 8].

Pour obtenir un environnement favorable à la croissance des plantes, une des voies serait de minimiser les facteurs de stress édaphiques. A ce titre, la caractérisation de la distribution de la DA peut guider le choix des pratiques culturales susceptibles de limiter les stress du sol liés à la DA. L'objectif de cette étude était de i) caractériser la variabilité de la DA sur un nitisol dérivé de cendres volcaniques et ii) évaluer son effet sur la distribution du système racinaire du bananier de hautes altitudes de l'Afrique de l'Est.

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 SITE D'ETUDE ET CONDUITE DE L'ESSAI

Cette étude a été menée au centre de recherche INERA Mulungu (2,335°S, 28,788°E, 1.699 m d'altitude) dans la province du Sud-Kivu, à l'Est de la RD Congo. Mulungu a un climat tropical de type Aw3 [9] et une pluviosité moyenne annuelle autour de 1600 mm, distribuée de manière bimodale. Le sol appartient à la classe de nitisol de la classification FAO-UNESCO, développé sur cendres volcaniques [10].

L'essai expérimental a été installé en mars 2008. Trois traitements alternatifs ont été comparés au système local courant (labour et exportation des résidus de cultures =T0) : non labour + paillage de résidus de bananiers uniquement (T1), non labour + paillage de résidus de bananiers + paillage supplémentaire de *Hyparrhenia diplandra* (T2) ou paillage de résidus de bananiers + paillage de *Tripsacum laxum* (T3). Le dispositif expérimental était le bloc complet randomisé à quatre traitements et quatre répétitions. Les rejets 'baïonnettes' (rejet à feuilles lancéolées) de la variété locale de bananes à jus ('bière') de hautes altitudes 'Ndundu' ont été plantés aux écartements de 2 m x 2 m (2.500 plants.ha⁻¹) dans des trous de plantation de 50 x 50 x 50 cm, remplis avec le sol des horizons de surface. Tous les traitements étaient soumis à une association bananier-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). Le haricot de type nain (variété 'Ngwaku-Ngwaku') a été semé aux écartements de 40 cm x 20 cm, deux graines par poquet (environ 250.000 plants.ha⁻¹). Aucun engrais minéral ou fumure organique de fond n'a été appliqué. Les principales pratiques culturales appliquées étaient l'œilletonnage pour éliminer les rejets de bananier en surnombre, le sarclage pour éliminer les adventices, l'élagage des feuilles non fonctionnelles de bananier (surface du limbe moins de 50% verte), le tuteurage et l'élimination du bourgeon mâle après ouverture complète des fleurs femelles du bananier.

2.2 PARAMÈTRES MESURÉS

La densité racinaire du bananier et la DA du sol ont été décrites concomitamment. Les traitements ne pouvant pas affecter la DA et la distribution racinaire dans les horizons profonds, les valeurs présentées dans cette étude correspondent à la moyenne des seize profils décrits.

Dans chaque parcelle élémentaire (répétition d'un traitement), un plant de bananier de 2^{ème} cycle a été sélectionné pour les mesures. Un profil (2 m de large x 1 m de profondeur) a été ouvert à 40 cm du pseudo-tronc du bananier sélectionné. Le profil racinaire a été observé après dégagement soigneux de la terre sur une épaisseur horizontale de 10 cm pour exposer les racines. La densité racinaire (nombre de racines.dm⁻²) a été déterminée en dénombrant le nombre de racines dans chacune des 200 mailles de 10 cm² du maillage [11]. Dans le profil, par tranche de 10 cm (0-100 cm), trois échantillons de sol non perturbés ont été prélevés au moyen de cylindres de Kopecki (100 cm³) pour la détermination de la DA par la méthode gravimétrique (masse du sol après séchage à l'étuve à 105°C pendant 48h). La porosité totale du sol a été calculée suivant la

méthode décrite par [12]. Des échantillons composites de sol ont été prélevés pour la détermination de la texture et de la teneur en Corg, deux des principaux facteurs qui affectent la DA. De 0 à 100 cm de profondeur, par tranche de 10 cm, les prélèvements de tous les profils ont été combinés pour faire un échantillon composite par profondeur. Ces échantillons composites ont été séchés à l'air libre, broyés et tamisés sur maille de 2 mm de diamètre avant les analyses. La texture du sol a été déterminée par la méthode combinant l'utilisation d'ultrasons et de résines sodiques [13] sans destruction préalable de la matière organique, et le Corg du sol a été dosé suivant la méthode de [14].

2.3 ANALYSE DES DONNÉES

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été effectuée, au moyen du logiciel SAS-JMP (version 9,0), pour déterminer l'influence des propriétés du sol (DA, texture, Corg) sur la densité racinaire. Sur base de la texture de chaque profondeur de mesure, la densité apparente limitante pour la croissance des racines ('Growth-limiting bulk density, GLBD' ou densité apparente critique) a été estimée sur base des courbes d'iso-densités de Daddow et Warrington [3] (Annexe 1). La distribution racinaire a été décrite de deux manières : i) premièrement, nous avons calculé la densité racinaire moyenne (racines.dm⁻²) par couche de mesure (0-100 cm, tous les 10 cm), ii) deuxièmement, nous avons déterminé la distribution racinaire spatiale, au moyen du logiciel Surfer (version 6,0 ; méthode d'interpolation : pondération par distance inverse-IDW).

3 RESULTATS

Le tableau 1 montre que la DA tend à accroître avec la profondeur du sol. Les couches de surface sont systématiquement moins denses (0,85 à 0,92 g.cm⁻³ sur 0-40 cm) comparées aux couches profondes du sol (1,04 et 1,08 g.cm⁻³ entre 60 et 100 cm). Les couches 40-50 et 50-60 cm présentent cependant des valeurs intermédiaires. La teneur en Corg varie entre 4,9 et 0,94% suivant la profondeur, et présente une tendance de distribution contraire à celle observée pour la DA (Tableau 1). La teneur en Corg varie faiblement dans les 40 premiers cm, chute brutalement entre 40 et 50 cm puis décroît graduellement avec la profondeur (Tableau 1). Les valeurs de GLBD et GLBD-DA (différence entre 'Growth-limiting bulk density' et la densité apparente du sol mesurée) tendent à décroître avec la profondeur, particulièrement entre 70 et 100 cm de profondeur. Les valeurs de GLBD sont supérieures à celles de DA quelle que soit la profondeur de mesure. Le sol est de texture argileuse sur l'ensemble du profil, avec une teneur en argile de 47,6 en surface à environ 70,0% en profondeur. Plus la couche du sol est riche en argile plus faible est la valeur de GLBD-DA. Suivant la profondeur, les teneurs en sable et limon varient entre 13,0 et 29,0%. Contrairement à la teneur en sable qui tend à diminuer avec la profondeur, la teneur en limon s'accroît sur les 40 premiers cm puis diminue sur les six dernières couches de mesure (Tableau 1).

La densité racinaire du bananier est plus faible sur les dix premiers centimètres, s'accroît à 20 cm où elle atteint la valeur maximale sur l'ensemble du profil (3,4 racines.dm⁻²) puis décroît avec la profondeur (Figure 1 et Tableau 1). Entre 40 et 100 cm, la densité décroît racinaire décroît graduellement et reste inférieure à 0,90 racine.dm⁻² quelles que soient la profondeur de mesure et la distance par rapport au pseudo-tronc.

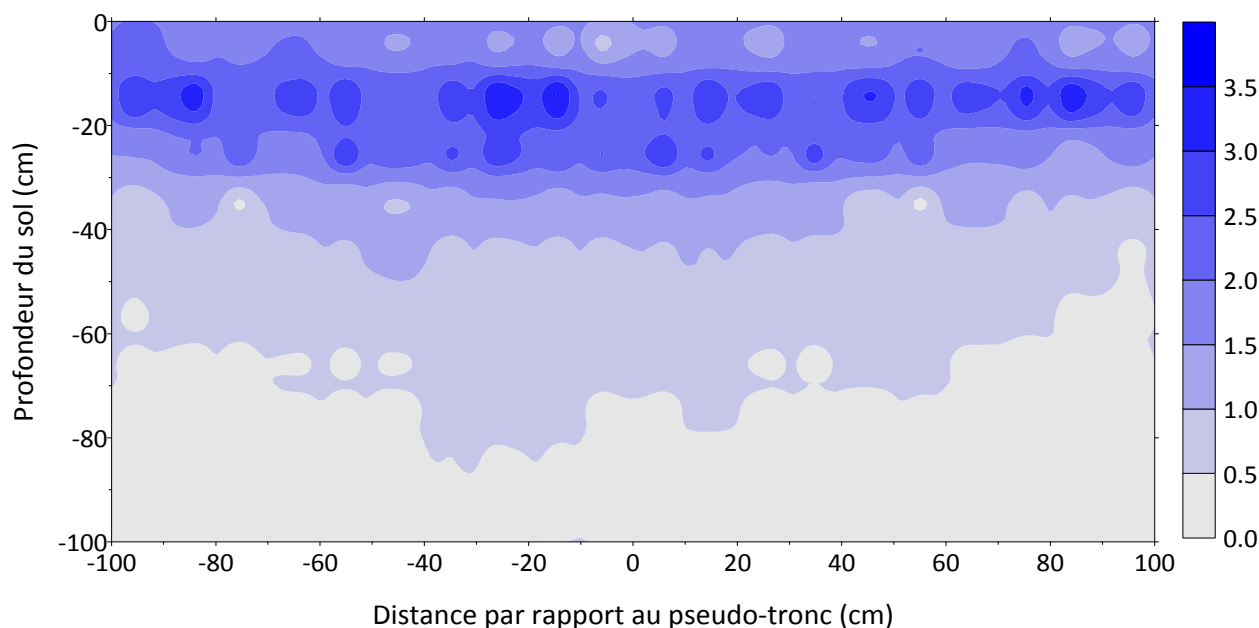


Figure 1. Distribution spatiale du système racinaire du bananier de hautes altitudes (*Musa AAA-EA*, cv 'Ndundu') sur un nitisol dérivé des cendres volcaniques à Mulungu. La légende indique le nombre de racines.

Tableau 1. Teneur en carbone organique (Corg), densité apparente du sol (DA), porosité totale (P.T), 'Growth-limiting bulk density' (GLBD), GLBD-DA, teneur en argile (<2 µm), teneur en limon (2-50 µm), teneur en sable (>50 µm) et densité racinaire mesurées sur un nitisol dérivé de cendres volcaniques à Mulungu.

Prof. (cm)	Corg (%)	DA (g.cm ⁻³) ¹	P.T	GLBD (g.cm ⁻³)	GLBD-DA (g.cm ⁻³)	Argile (%)	Limon (%)	Sable(%)	Densité racinaire (Racines.dm ⁻²) ¹
0-10	4,90	0,87 ±0,03	0,67	1,45	0,58	47,59	24,97	27,44	1,53±0,09
10-20	4,54	0,85 ±0,02	0,68	1,45	0,60	47,75	28,65	23,60	3,43±0,33
20-30	4,59	0,92 ±0,02	0,65	1,47	0,55	47,35	28,27	24,38	2,38±0,15
30-40	4,00	0,92 ±0,03	0,65	1,46	0,54	46,95	27,89	25,16	0,92±0,13
40-50	2,87	0,93 ±0,04	0,65	1,46	0,53	54,43	20,31	25,26	0,71±0,06
50-60	2,11	0,96 ±0,04	0,64	1,41	0,45	62,56	18,09	19,35	0,64±0,04
60-70	1,82	1,04 ±0,07	0,61	1,36	0,32	69,98	16,37	13,65	0,46±0,02
70-80	1,16	1,08 ±0,06	0,59	1,36	0,28	69,95	16,81	13,25	0,32±0,03
80-90	1,02	1,07 ±0,05	0,60	1,36	0,29	69,92	17,24	12,84	0,24±0,03
90-100	0,94	1,06 ±0,04	0,60	1,38	0,32	68,55	16,19	15,26	0,13±0,05

P.T : porosité totale. Valeurs = moyennes, 1. Moyennes (n = 16) ± erreur standard.

La relation entre les propriétés du sol (texture, Corg et DA) et la densité racinaire (Figure 2 et Tableau 2) met en évidence i) l'accroissement de la DA avec la teneur en argile du sol, ces deux facteurs affectent négativement la densité racinaire ; ii) l'augmentation de la teneur en limon et en carbone organique, par contre, favorisent une densité racinaire plus élevée, iii) une relation négative entre la GLBD-DA et la teneur en argile.

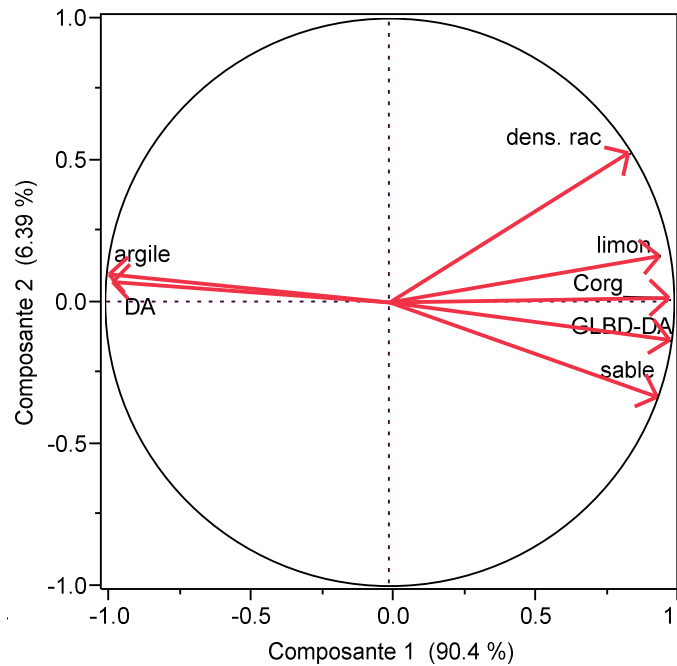


Figure 2. Analyse en Composantes Principales (ACP) : plan principal et cercle de corrélation entre les propriétés du sol (DA, texture-argile, limon, sable, Corg et GLBD-DA) et la densité racinaire.

Tableau 2. Matrice de corrélation entre les constituants granulométriques du sol et la GLBD-DA.

	Argile	Limon	Sable	GLBD-DA
Argile	1	-0,842	-0,818	-0,827
Limon	0,002	1	0,648	0,863
Sable	0,004	0,043	1	0,815
GLBD-DA	0,003	0,001	0,004	1

Les valeurs en dessous de la diagonale indiquent les P-valeurs ($P = 0,05$).

4 DISCUSSION

La variation de la DA suivant la profondeur de mesure traduit un gradient de distribution de la DA sur le sol de Mulungu (Tableau 1), caractérisé par un accroissement des contraintes liées à la DA dans les couches profondes du sol. Les plus faibles valeurs de DA sur les quarante premiers cm du sol pourraient s'expliquer par les teneurs élevées en Corg et des valeurs relativement plus faibles en argile (Tableau 1). La référence [15] a rapporté des teneurs élevées en oxydes de Fe/Al sur les couches superficielles du sol de Mulungu. Les teneurs élevées en Corg et en oxydes de Fe/Al ainsi que l'argile favoriseraient vraisemblablement une structure micro-agrégée plus développée sur les premières couches du sol et par conséquent, des faibles valeurs de DA par rapport aux couches subjacentes. Les fortes teneurs en Corg des premières couches du sol (0-40 cm) peuvent être attribuables à la formation préférentielle des complexes minéraux-humus (argile-humus, oxydes de Fe/Al-humus) qui, très fréquente sur les sols d'origine volcanique, rendent la matière organique résistante à la décomposition microbienne et conduit à l'accumulation de quantités considérables de matière organique [16]. L'accroissement des valeurs de DA en profondeur peut s'expliquer par la réduction de la teneur en Corg (matière organique) avec la profondeur, ce qui peut conduire à un moindre développement de la structure du sol. La compaction des horizons profonds suite au poids des horizons supérieurs (pression de surcharge) et la plus faible colonisation racinaire des horizons profonds peuvent également expliquer l'augmentation de la DA [6].

La distribution racinaire du bananier présente une tendance contraire à celle de la DA (Tableau 1). La baisse de la densité racinaire dans les couches profondes du sol (Figure 1) pourrait donc s'expliquer par l'accroissement des valeurs de DA. Pour le bananier (*Musa spp.*), plusieurs auteurs ont rapporté des résultats similaires. Par exemple, [8] ont rapporté qu'un accroissement de la DA de 1,00 à 1,75 g.cm⁻³ entraînait une réduction du poids frais des racines de diamètre >2 mm de 60,0 à 33,9 g.dm⁻³ du sol. La majorité de racines (77%) est concentrée dans les quatre premières couches de mesure (0-40 cm), et

serait liée à des conditions édaphiques plus propices de ces couches du sol au développement racinaire, notamment de faibles valeurs de DA, des teneurs en argile relativement plus faibles et de fortes teneurs en Corg.

Pour toutes les profondeurs de mesure, les valeurs de GLBD sont supérieures à celles de DA. Il paraît donc que, sur l'ensemble du profil (0-100 cm), les racines du bananier ne seraient pas soumises aux contraintes liées à la DA. Toutefois, la chute brutale de la densité racinaire entre 30 et 40 cm et la plus faible densité racinaire (entre 0,71 et 0,13 racine.dm⁻²) dans les couches du sol sous-jacentes plus denses, pourraient mettre en évidence un effet négatif de l'accroissement de la DA sur le développement racinaire du bananier. Dans les conditions édaphiques de cette étude, la GLBD serait donc atteinte à une valeur inférieure à celle estimée sur base des lignes d'iso-densités de Daddow et Warrington [3]. Toutefois, il importe d'indiquer que ces lignes d'iso-densités ne doivent pas être de stricte application pour cette étude. En effet, le triangle textural de GLBD a été établi à partir d'échantillons de sols ayant une teneur en matière organique inférieure à 3,0% et moins de 10% de refus (= particules >2 mm). Par ailleurs, les lignes d'iso-densités sont basées sur l'hypothèse d'une densité réelle de 2,65 g.cm⁻³. Dans cette étude, la teneur en matière organique du sol (Corg x 1,724) a varié entre 1,62 et 8,44%. Pour la culture bananière, [11] ont également rapporté des 'seuils critiques' de DA variables en fonction du type de sols (par exemple, 1,05 à 1,20 g.cm⁻³ sur sols brun rouille à halloysite, 1,20 à 1,40 g.cm⁻³ sur ferrisols, 0,80 à 0,90 g.cm⁻³ sur andosols sur cendres et ponces).

Les plus faibles valeurs de GLBD-DA sont observées dans les couches du sol plus riches en argile (50-100 cm, Tableau 1), les racines du bananier croissant dans ces couches du sol paraissent donc être soumises à une résistance mécanique du sol supérieure à celle des couches à faible teneur en argile. En effet, les couches du sol plus riches en argile ont des valeurs de porosité totale plus faibles (Tableau 1), ce qui peut vraisemblablement limiter l'extension racinaire dans ces couches du sol. Du fait d'une relation négative entre la teneur en argile et la GLBA-DA (Figure 2 et Tableau 2), l'argile paraît donc être le principal constituant granulométrique qui affecte la croissance racinaire du bananier sur le sol sous étude. Sur des sols très riches en argile (>60%), [2] a également rapporté une réduction sensible de la croissance racinaire du bananier.

La texture du sol n'étant pas facilement contrôlable par l'homme, une des alternatives pour favoriser la croissance racinaire du bananier sur des sols denses serait d'appliquer les pratiques culturales qui réduisent la densité apparente du sol. Ces pratiques culturales sont, entre autres, l'apport de la matière organique qui favorise la re-structuration biologique du sol et améliore sa fertilité, le travail du sol qui ameublisse le sol sur la couche labourée et la rotation du bananier avec une culture à forte capacité de production de biomasse racinaire et à système racinaire profond et agressif.

A l'opposé du travail du sol avant la plantation de bananiers dont les effets positifs ont été rapportés par plusieurs auteurs (par exemple, [1]), le travail du sol dans une bananeraie établie entraîne la coupe des racines sur la couche du sol labourée, ce qui peut impacter négativement la croissance du bananier, notamment dans les jeunes plantations de bananiers [17] et sur les sols pauvres. Par ailleurs, [10] a observé que le travail manuel du sol avec exportation de résidus de récolte de bananes réduisaient le rendement du bananier de hautes altitudes de l'Afrique de l'Est.

5 CONCLUSION

Cette étude a mis en évidence un gradient de distribution de la densité apparente sur un nitisol dérivé des cendres volcaniques à Mulungu. Sur l'ensemble du profil (0-100 cm), la densité apparente a varié entre 0,85 et 1,08 g.cm⁻³. Les couches de surface (0-40 cm), riches en carbone organique et pauvres en argile sont systématiquement moins denses que les couches profondes du sol, plus argileuses et pauvres en carbone organique. La variabilité de la densité apparente suivant la profondeur de mesure entraîne une hétérogénéité verticale caractérisée par un accroissement des contraintes liées à la densité apparente dans les couches subjacentes du sol. Cet accroissement de la densité apparente du sol a sensiblement réduit la densité racinaire et limité l'exploration racinaire du bananier dans les couches profondes du sol. Pour favoriser la croissance du bananier dans les sols denses, il est serait nécessaire d'appliquer les pratiques culturales qui permettent de réduire la densité apparente, notamment l'apport de la matière organique et le travail du sol avant plantation de bananier.

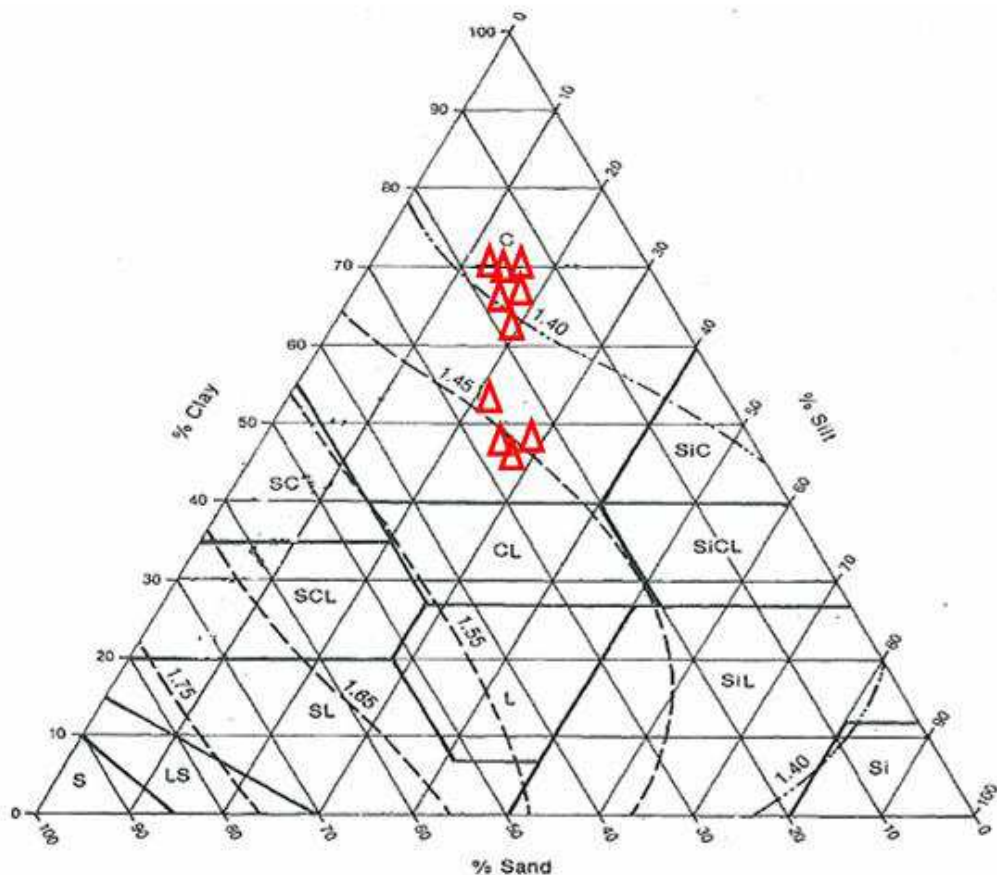
REMERCIEMENT

Sincères remerciements à la DGDC Belgique qui, à travers le Consortium for Improving Agriculture-based Livelihoods in Central Africa (CIALCA), a financé l'essai de cette étude. Merci à Adolphe Ombeni, Jean-Marie Chamunani et Cizungu Namegabe pour la collecte des données supplémentaires.

REFERENCES

- [1] G. Blomme, R. Swennen, and A. Tenkouano, "The effect of soil bulk density on root and overall plant development in six banana varieties", *Infomusa*, vol. 11, no. 2, pp. 38-40, 2002.
- [2] R. Vaquero, *Soil physical properties and banana root growth*, In: D.W. Turner and F.E. Rosales (Eds) *Banana Root System: towards a better understanding for its productive management*, Proceeding of an International Symposium, San José, pp. 125-131, 2005.
- [3] S.K. Arunachalam, C. Hinz, and G. Aylmore, *Soil physical properties affecting root growth in rehabilitated gold mine tailings*, 3rd Australian New Zealand Soils Conference, University of Sydney, Australia, 2004.
- [4] R.A. Kumar, P. Biswajit, and S. Gurdeep, "A study on the bulk density and its effect on the growth of selected grasses in coal mine overburden dumps, Jharkhand, India", *International Journal of Environmental Sciences*, vol. 1, no. 4, pp. 677-684, 2010.
- [5] I. Malecka, A. Blecharczyk, Z. Sawinska, and T. Dobrzeński "The effect of various long-term tillage systems on soil properties and spring barley yield", *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 36, pp. 217-226, 2012.
- [6] M.A. Arshad, B. Lowery, B. Grossman, *Physical Tests for Monitoring Soil Quality*, In: J.W. Doran and A.J. Jones (Eds) *Methods for assessing soil quality*, Madison, WI: pp. 123-141, 1996.
- [7] K. Trükmann, E. Reintam, J. Kuht, E. Nugis, and L. Edesi, "Effect of soil compaction on growth of narrow-leafed lupine, oilseed rape and spring barley on sandy loam soil", *Agronomy Research*, vol. 6, no. 1, pp. 101-108, 2008.
- [8] T. Pattison and S. Lindsay, *Banana root and soil health user's manual. Soil and root health for sustainable banana production*, Department of Primary Industries and Fisheries, Queensland, 2006.
- [9] C.M. Peel, B.L. Finlayson, and T.A. McMahon, "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, pp. 1633-1644, 2007.
- [10] M.T. Muliele, "Impact de l'agriculture de conservation sur le rendement du bananier de hautes altitudes de la Région des Grands Lacs d'Afrique (*Musa* spp., AAA-EA)", *Congo Sciences*, vol. 2, no. 2, pp. 128-134, 2014a.
- [11] B. Delvaux and P. Guyot, "Caractérisation de l'enracinement du bananier au champ. Incidences sur les relations sol-plante dans les bananeraies intensives de la Martinique", *Fruits*, vol. 44, pp. 633-647, 1989.
- [12] C. Tafangenyasha, A.T. Mthembu, H. Chikoore, N. Ndimande, S. Xulu, and N. Gcwensa, "The effects of soil density on the vegetation of the Umfolozi catchment in South Africa", *Journal of Soil Science and Environmental Management*, vol. 2, no. 1, pp. 14-24, 2011.
- [13] C. Feller, G. Burtin, B. Gerard, and J. Balesdent, "Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols : intérêt et limites", *Science du Sol*, vol. 29, pp. 77-93, 1991.
- [14] A. Walkley and I.A. Black, "An examination of degiareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the Chromic acid titration method", *Soil Science*, vol. 37, pp. 29-38, 1934.
- [15] T.M. Muliele, *Influence du travail et de la couverture du sol sur les propriétés physiques du sol et le système racinaire du bananier de hautes altitudes de la Région des Grands Lacs d'Afrique (Sud-Kivu en RD Congo, Rwanda et Burundi)*, Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Belgique, 2014b.
- [16] E. Garrido and F. Matus, "Are organo-mineral complexes and allophone content determinant factors for the carbon level in Chilean volcanic soils?", *Catena*, vol. 92, pp. 106-112, 2012.
- [17] M.T. Muliele, P.J.A. van Asten, and C.L. Biielders, "Short- and medium-term impact of manual tillage and no-tillage with mulching on banana roots and yields in banana-bean intercropping systems in the East African Highlands", *Field Crops Research*, vol. 171, pp. 1-10, 2015.

ANNEXE 1.



Projection des données de texture du sol de différentes profondeurs de mesure (0-100 cm, tous les 10 cm) sur le diagramme textural de densité apparente limitante pour la croissance, GLBD de Daddow et Warrington [3]. Les lignes iso-densités (lignes discontinues) représentent les textures d'égale GLBD.